



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 197 33 560 A 1**

⑤① Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**H 02 N 2/06**  
F 02 D 41/30

②① Aktenzeichen: 197 33 560.8  
②② Anmeldetag: 2. 8. 97  
④③ Offenlegungstag: 4. 2. 99

DE 197 33 560 A 1

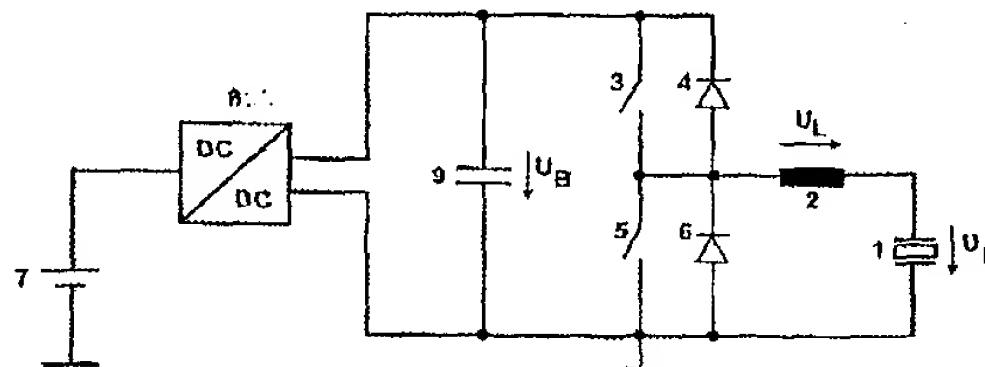
⑦① Anmelder:  
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

⑦② Erfinder:  
Reineke, Joerg, 70469 Stuttgart, DE; Hock,  
Alexander, 70435 Stuttgart, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤④ Verfahren und Vorrichtung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements

⑤⑦ Es werden ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements (1) beschrieben, wobei der das piezoelektrische Element ladende Ladestrom bzw. der das piezoelektrische Element entladende Entladestrom über ein induktives Bauelement (2) geführt wird. Das beschriebene Verfahren und die beschriebene Vorrichtung zeichnen sich dadurch aus, daß ein im Ladestromkreis vorgesehener Schalter (3) bzw. ein im Entladestromkreis vorgesehener Schalter (5) während des Ladens bzw. Entladens derart wiederholt betätigt wird, daß das piezoelektrische Element durch einen vorgegebenen mittleren Lade- bzw. Entladestrom auf eine vorgegebene Spannung gebracht wird.



DE 197 33 560 A 1

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 und eine Vorrichtung gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 10, d. h. ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements, wobei der das piezoelektrische Element ladende Ladestrom bzw. der das piezoelektrische Element entladende Entladestrom über ein induktive Eigenschaften aufweisendes Bauelement geführt wird.

Bei den vorliegend näher betrachteten piezoelektrischen Elementen handelt es sich insbesondere, aber nicht ausschließlich um als Aktoren bzw. Stellglieder verwendete piezoelektrische Elemente. Piezoelektrische Elemente lassen sich für derartige Zwecke einsetzen, weil sie bekanntermaßen die Eigenschaft aufweisen, sich in Abhängigkeit von einer daran angelegten Spannung zusammenzuziehen oder auszudehnen.

Die praktische Realisierung von Stellgliedern durch piezoelektrische Elemente erweist sich insbesondere dann von Vorteil, wenn das betreffende Stellglied schnelle und/oder häufige Bewegungen auszuführen hat.

Der Einsatz von piezoelektrischen Elementen als Stellglied erweist sich unter anderem bei Kraftstoff-Einspritzdüsen für Brennkraftmaschinen als vorteilhaft zur Einsetzbarkeit von piezoelektrischen Elementen in Kraftstoff-Einspritzdüsen wird beispielsweise auf die EP 0 371 469 B1 und die EP 0 379 182 B1 verwiesen.

Piezoelektrische Elemente sind kapazitive Verbraucher, welche sich, wie vorstehend bereits angedeutet wurde, entsprechend dem jeweiligen Ladungszustand bzw. der sich daran einstellenden oder angelegten Spannung zusammenziehen und ausdehnen.

Das Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements kann unter anderem über ein induktive Eigenschaften aufweisendes Bauelement wie beispielsweise eine Spule erfolgen, wobei diese Spule in erster Linie dazu dient, den beim Laden auftretenden Ladestrom und den beim Entladen auftretenden Entladestrom zu begrenzen. Eine solche Anordnung ist in Fig. 8 veranschaulicht.

Das zu ladende bzw. zu entladende piezoelektrische Element ist in der Fig. 8 mit dem Bezugszeichen 101 bezeichnet. Es ist Bestandteil eines über einen Ladeschalter 102 schließbaren Ladestromkreises und eines über einen Entladeschalter 106 schließbaren Entladestromkreises, wobei der Ladestromkreis aus einer Serienschaltung des Ladeschalters 102, einer Diode 103, einer Ladespule 104, des piezoelektrischen Elements 101, und einer Spannungsquelle 105 besteht, und wobei der Entladestromkreis aus einer Serienschaltung des Entladeschalters 106, einer Diode 107, einer Entladespule 108 und des piezoelektrischen Elements 101 besteht.

Die Diode 103 des Ladestromkreises verhindert, daß im Ladestromkreis ein das piezoelektrische Element entladender Strom fließen kann. Die Diode 103 und der Ladeschalter 102 sind gemeinsam als ein Halbleiterschalter realisierbar.

Die Diode 107 des Entladestromkreises verhindert, daß im Entladestromkreis ein das piezoelektrische Element ladender Strom fließen kann. Die Diode 107 und der Entladeschalter 106 sind wie die Diode 103 und der Ladeschalter 102 gemeinsam als ein Halbleiterschalter realisierbar.

Wird der normalerweise geöffnete Ladeschalter 102 geschlossen, so fließt im Ladestromkreis ein Ladestrom, durch welchen das piezoelektrische Element 101 geladen wird; die im piezoelektrischen Element 101 gespeicherte Ladung bzw. die sich an diesem dadurch einstellende Spannung und damit auch die aktuellen äußeren Abmessungen des piezo-

elektrischen Elements 101 werden nach dem Laden desselben im wesentlichen unverändert beibehalten.

Wird der normalerweise ebenfalls geöffnete Entladeschalter 106 geschlossen, so fließt im Entladestromkreis ein Entladestrom, durch welchen das piezoelektrische Element 101 entladen wird; der Ladezustand des piezoelektrischen Elements 101 bzw. die sich an diesem dadurch einstellende Spannung und damit auch die aktuellen äußeren Abmessungen des piezoelektrischen Elements 101 werden nach dem Entladen desselben im wesentlichen unverändert beibehalten.

Ein derartiges Laden und Entladen von piezoelektrischen Elementen ist vorteilhaft, weil es mangels nennenswerter ohmscher Widerstände im Ladestromkreis und im Entladestromkreis verlustleistungsarm und unter nur relativ geringer Wärmeentwicklung erfolgen kann.

Andererseits sind aber das Ausmaß und der zeitliche Verlauf des Ladens und des Entladens häufig nicht ideal. Störend sind vor allem zeitlich variierende Lade- und Entladeschwindigkeiten, mehr oder weniger stark ausgeprägte Einschwingvorgänge und ein nur teilweises oder zu starkes Laden und/oder Entladen des piezoelektrischen Elements, wodurch beim Entladen sogar ein Aufladen mit entgegengesetzter Polarität erfolgen kann.

Es dürfte einleuchten, daß dies nicht nur eine nicht unerhebliche Belastung für das zu ladende bzw. zu entladende piezoelektrische Element darstellt, sondern auch dessen bestimmungsgemäßen Gebrauch beeinträchtigen kann.

Der vorliegenden Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, das Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 bzw. die Vorrichtung gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 10 derart weiterzubilden, daß das Laden und das Entladen von piezoelektrischen Elementen schonend für diese und einfach an die individuellen oder wechselnde Verhältnisse anpaßbar durchgeführt werden können.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die im kennzeichnenden Teil des Patentanspruchs 1 (Verfahren) und durch die im kennzeichnenden Teil des Patentanspruchs 10 (Vorrichtung) beanspruchten Merkmale gelöst.

Demnach ist vorgesehen,

– daß ein im Ladestromkreis vorgesehener Schalter bzw. ein im Entladestromkreis vorgesehener Schalter während des Ladens bzw. Entladens derart wiederholt betätigt wird, daß das piezoelektrische Element durch einen vorgegebenen mittleren Lade- bzw. Entladestrom auf eine vorgegebene Spannung gebracht wird (kennzeichnender Teil des Patentanspruchs 1) bzw.

– daß eine Steuer- oder Regeleinrichtung vorgesehen ist, welche dazu ausgelegt ist, einen im Ladestromkreis vorgesehenen Schalter bzw. einen im Entladestromkreis vorgesehenen Schalter während des Ladens bzw. Entladens derart wiederholt zu betätigen, daß das piezoelektrische Element durch einen vorgegebenen mittleren Lade- bzw. Entladestrom auf eine vorgegebene Spannung gebracht wird (kennzeichnender Teil des Patentanspruchs 10)

Durch das wiederholte Öffnen und Schließen der jeweiligen Schalter wird ein getaktetes Laden bzw. Entladen durchgeführt. Dadurch ändern sich die Funktion und Wirkungsweise des die induktiven Eigenschaften aufweisenden Bauelements.

Bisher wirkte es als das induktive Element eines im Zusammenwirken mit dem piezoelektrischen Element gebildeten LC-Reihenschwingkreises, wobei die Induktivität des induktiven Elements und die Kapazität des piezoelektrischen Elements allein den Verlauf und den Umfang des La-

dens und des Entladens bestimmten (geladen und entladen werden konnte jeweils nur mit der ersten Stromhalbwelle der ersten Schwingkreisschwingung, denn ein Weiter-schwingen des Schwingkreises wird durch die im Lade-stromkreis und Entladestromkreis enthaltenen Dioden un-terbunden).

Jetzt (bei der getakteten Ansteuerung) wird das die induktiven Eigenschaften aufweisende Element als ein Energie-zwischenspeicher verwendet, der abwechselnd von der Stromversorgungsquelle (beim Laden) bzw. vom piezoelek-trischen Element (beim Entladen) zugeführte elektrische Energie (in Form von magnetischer Energie) speichert und – nach einer entsprechenden Schalterbetätigung – die gespei-cherte Energie in Form von elektrischer Energie an das pie-zoelektrische Element (beim Laden) bzw. einen anderen Energiespeicher oder einen elektrischen Verbraucher (beim Entladen) abgibt, wobei die Zeitpunkte und die Dauer (und damit auch der Umfang) der Energiespeicherung und der Energieabgabe durch die Schalterbetätigung(en) bestimmt werden.

Dadurch kann das piezoelektrische Element in beliebig vielen, beliebig großen und in beliebigen zeitlichen Abstän-den aufeinanderfolgenden Stufen wunschgemäß weit gela-den und entladen werden.

Als Folge dessen können sowohl das Ausmaß als auch der zeitliche Verlauf des Ladens und/oder des Entladens wunschgemäß beeinflusst werden, und zwar weitgehend un-abhängig von den technischen Daten des die induktiven Ei-genschaften aufweisenden Bauelements und des piezoelek-trischen Elements.

Nutzt man die gegebenen Möglichkeiten dahingehend aus, daß man die Schalter derart wiederholt öffnet und schließt, daß das piezoelektrische Element durch einen vor-gegebenen mittleren Lade- bzw. Entladestrom auf eine vor-gegebene Spannung gebracht wird, so können das Laden und das Entladen von piezoelektrischen Elementen schon-nd für diese und einfach an die individuellen und wech-selnden Verhältnisse anpaßbar durchgeführt werden.

Die zumindest teilweise Entkopplung des Ausmaßes und des zeitlichen Verlaufs des Ladens und/oder des Entladens von den technischen Daten des die induktiven Eigenschaf-ten aufweisenden Elements und des piezoelektrischen Ele-ments ermöglicht es darüber hinaus, nur ein einziges induk-tive Eigenschaften aufweisendes Element vorzusehen und dieses sowohl zum Laden als auch zum Entladen des piezo-elektrischen Elements zu verwenden; beim eingangs be-schriebenen herkömmlichen Verfahren zum Laden und Ent-laden eines piezoelektrischen Elements ist eine Zusammen-fassung der Ladespule und der Entladespule nicht ohne wei-teres möglich, weil diese vorzugsweise unterschiedliche In-duktivitäten aufweisen.

Das die induktiven Eigenschaften aufweisende Element kann bei Bedarf sehr klein ausgebildet werden; die geringe Energiespeicherkapazität bzw. das schnelle Erreichen der Sättigung kann durch Vorsehen einer erhöhten Anzahl von Lade- und/oder Entladetakten ausgeglichen werden.

Dadurch läßt sich die Anordnung zum Laden und Entla-den von piezoelektrischen Elementen trotz deren verbesser-ter Funktion erheblich kleiner aufbauen als es bislang mög-lich war.

Weitere vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher erläutert. Es zeigen

Fig. 1 eine gegenüber herkömmlichen Anordnungen ver-einfachte aufgebaute Anordnung zum Laden und Entladen ei-nes piezoelektrischen Elements,

Fig. 2 eine Darstellung zur Erläuterung der sich während einer ersten Ladephase (Ladeschalter 3 geschlossen) in der Anordnung nach Fig. 1 einstellenden Verhältnisse,

Fig. 3 eine Darstellung zur Erläuterung der sich während einer zweiten Ladephase (Ladeschalter 3 wieder geöffnet) in der Anordnung nach Fig. 1 einstellenden Verhältnisse,

Fig. 4 eine Darstellung zur Erläuterung der sich während einer ersten Entladephase (Entladeschalter 5 geschlossen) in der Anordnung nach Fig. 1 einstellenden Verhältnisse,

Fig. 5 eine Darstellung zur Erläuterung der sich während einer zweiten Entladephase (Entladeschalter 5 wieder geöff-net) in der Anordnung nach Fig. 1 einstellenden Verhält-nisse,

Fig. 6 den zeitlichen Verlauf von sich bei der erfindungs-gemäßen Ansteuerung der Anordnung gemäß Fig. 1 einstel-legenden Spannungs- und Stromverläufen,

Fig. 7 eine schematische Darstellung des zeitlichen Ver-laufs der sich an einem piezoelektrischen Element während des Ladens einstellenden Spannung, und

Fig. 8 eine herkömmliche Anordnung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements.

Die piezoelektrischen Elemente, deren Laden und Entla-den im folgenden näher beschrieben wird, sind beispiels-weise als Stellglieder in Kraftstoff-Einspritzdüsen (insbe-sondere in sogenannten Common Rail Injektoren) von Brennkraftmaschinen einsetzbar. Auf einen derartigen Ein-satz der piezoelektrischen Elemente besteht jedoch keinerlei Einschränkung; die piezoelektrischen Elemente können grundsätzlich in beliebigen Vorrichtungen für beliebige Zwecke eingesetzt werden.

Es wird davon ausgegangen, daß sich die piezoelektri-schen Elemente im Ansprechen auf das Laden ausdehnen und im Ansprechen auf das Entladen zusammenziehen. Die Erfindung ist selbstverständlich jedoch auch dann anwend-bar, wenn dies gerade umgekehrt ist.

Es wird nun unter Bezugnahme auf Fig. 1 eine gegenüber herkömmlichen Anordnungen vereinfachte Anordnung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements be-schrieben, wobei die Vereinfachung in erster Linie durch den Einsatz des erfindungsgemäßen Verfahrens bzw. der erfindungsgemäßen Vorrichtung ermöglicht wird.

Das piezoelektrische Element, das es im betrachteten Bei-spiel zu laden gilt, ist in der Fig. 1 mit dem Bezugszeichen 1 bezeichnet.

Wie aus der Fig. 1 ersichtlich ist, liegt der eine der An-schlüsse des piezoelektrischen Elements 1 dauerhaft auf Masse (ist mit einem ersten Pol einer Spannungsquelle ver-bunden), wohingegen der andere der Anschlüsse des pie-zoelektrischen Elements über eine (zugleich als Ladespule und Entladespule wirkende) Spule 2 und eine Parallelschal-tung aus einem Ladeschalter 3 und einer Diode 4 mit dem zweiten Pol der Spannungsquelle und über die Spule 2 und eine Parallelschaltung aus einem Entladeschalter 5 und einer Diode 6 mit dem ersten Pol der Spannungsquelle verbunden ist.

Die Spannungsquelle besteht aus einer Batterie 7 (bei-spielsweise einer KFZ-Batterie), einem dieser nachgeschal-tenen Gleichspannungswandler 8, und einem diesem nach-geschalteten, als Pufferkondensator dienenden Kondensator 9. Durch diese Anordnung wird die Batteriespannung (bei-spielsweise 12 V) in eine im wesentlichen beliebige andere Gleichspannung umgesetzt und als Versorgungsspannung bereitgestellt.

Das Laden und das Entladen des piezoelektrischen Ele-ments 1 erfolgen im betrachteten Beispiel getaktet. D.h., der Ladeschalter 3 und der Entladeschalter 5 werden während des Lade- bzw. Entladevorganges wiederholt geschlossen und geöffnet.



Die sich dabei einstellenden Verhältnisse werden nachfolgend unter Bezugnahme auf die Fig. 2 bis 5 erläutert, von denen die Fig. 2 und 3 das Laden des piezoelektrischen Elements 1, und die Fig. 4 und 5 das Entladen des piezoelektrischen Elements 1 veranschaulichen.

Der Ladeschalter 3 und der Entladeschalter 5 sind, wenn und solange kein Laden oder Entladen des piezoelektrischen Elements 1 erfolgt, geöffnet. In diesem Zustand befindet sich die in der Fig. 1 gezeigte Schaltung im stationären Zustand. D.h., das piezoelektrische Element 1 behält seinen Ladungszustand im wesentlichen unverändert bei, und es fließen keine Ströme.

Mit dem Beginn des Ladens des piezoelektrischen Elements 1 wird der Ladeschalter 3 wiederholt geschlossen und geöffnet; der Entladeschalter 5 bleibt hierbei geöffnet.

Beim Schließen des Ladeschalters 3 stellen sich die in der Fig. 2 gezeigten Verhältnisse ein. D.h., es wird ein aus einer Reihenschaltung aus dem piezoelektrischen Element 1, dem Kondensator 9 und der Spule 2 bestehender geschlossener Stromkreis gebildet, in welchem ein wie in der Fig. 2 durch Pfeile angedeuteter Strom  $i_{LE}(t)$  fließt. Dieser Stromfluß bewirkt, daß in der Spule 2 Energie gespeichert wird. Der Energiefluß in die Spule 2 wird dabei durch die positive Potentialdifferenz zwischen dem Kondensator 9 und dem piezoelektrischen Element 1 bewirkt.

Beim kurz (beispielsweise einige  $\mu s$ ) nach dem Schließen des Ladeschalters 3 erfolgenden Öffnen desselben stellen sich die in der Fig. 3 gezeigten Verhältnisse ein. D.h., es wird ein aus einer Reihenschaltung aus dem piezoelektrischen Element 1, der Diode 6 und der Spule 2 bestehender geschlossener Stromkreis gebildet, in welchem ein wie in der Fig. 3 durch Pfeile angedeuteter Strom  $i_{LA}(t)$  fließt. Dieser Stromfluß bewirkt, daß in der Spule 2 gespeicherte Energie vollständig in das piezoelektrische Element 1 fließt. Entsprechend der Energiezufuhr zum piezoelektrischen Element erhöhen sich die an diesem einstellende Spannung und dessen äußere Abmessungen. Nach erfolgtem Energietransport von der Spule 2 zum piezoelektrischen Element 1 ist wieder der vorstehend bereits erwähnte stationäre Zustand der Schaltung nach Fig. 1 erreicht.

Dann oder auch schon vorher oder auch erst später (je nach dem gewünschten zeitlichen Verlauf des Ladevorgangs) wird der Ladeschalter 3 erneut geschlossen und wieder geöffnet, wobei sich die vorstehend beschriebenen Vorgänge wiederholen. Durch das erneute Schließen und Öffnen des Ladeschalters 3 nimmt die im piezoelektrischen Element 1 gespeicherte Energie zu (die im piezoelektrischen Element bereits gespeicherte Energie und die neu zugeführte Energie summieren sich), und dementsprechend nehmen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und dessen äußere Abmessungen zu.

Wiederholt man das beschriebene Schließen und Öffnen des Ladeschalters 3 eine Vielzahl von Malen, so steigen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und die Ausdehnung des piezoelektrischen Elements stufenweise an (siehe hierzu die Kurve A der später noch genauer erläuterten Fig. 6).

Wurde der Ladeschalter 3 eine vorbestimmte Anzahl von Malen geschlossen und geöffnet und/oder hat das piezoelektrische Element 1 den gewünschten Ladezustand erreicht, so wird das Laden des piezoelektrischen Elements durch Offenlassen des Ladeschalters 3 beendet.

Soll das piezoelektrische Element 1 wieder entladen werden, so wird dies durch ein wiederholtes Schließen und Öffnen des Entladeschalters 5 bewerkstelligt; der Ladeschalter 3 bleibt hierbei geöffnet.

Beim Schließen des Entladeschalters 5 stellen sich die in der Fig. 4 gezeigten Verhältnisse ein. D.h., es wird ein aus

einer Reihenschaltung aus dem piezoelektrischen Element 1 und der Spule 2 bestehender geschlossener Stromkreis gebildet, in welchem ein wie in der Figur durch Pfeile angedeuteter Strom  $i_{EE}(t)$  fließt. Dieser Stromfluß bewirkt, daß die im piezoelektrischen Element gespeicherte Energie (ein Teil derselben) in die Spule 2 transportiert wird. Entsprechend dem Energietransfer vom piezoelektrischen Element 1 zur Spule 2 nehmen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und dessen äußere Abmessungen ab.

Beim kurz (beispielsweise einige  $\mu s$ ) nach dem Schließen des Entladeschalters 5 erfolgenden Öffnen desselben stellen sich die in der Fig. 5 gezeigten Verhältnisse ein. D.h., es wird ein aus einer Reihenschaltung aus dem piezoelektrischen Element 1, dem Kondensator 9, der Diode 4 und der Spule 2 bestehender geschlossener Stromkreis gebildet, in welchem ein wie in der Figur durch Pfeile angedeuteter Strom  $i_{EA}(t)$  fließt. Dieser Stromfluß bewirkt, daß in der Spule 2 gespeicherte Energie vollständig in den Kondensator 9 zurückgespeist wird. Nach erfolgtem Energietransport von der Spule 2 zum Kondensator 9 ist wieder der vorstehend bereits erwähnte stationäre Zustand der Schaltung nach Fig. 1 erreicht.

Dann oder auch schon vorher oder erst später (je nach dem gewünschten zeitlichen Verlauf des Entladevorgangs) wird der Entladeschalter 5 erneut geschlossen und wieder geöffnet, wobei sich die vorstehend beschriebenen Vorgänge wiederholen. Durch das erneute Schließen und Öffnen des Entladeschalters 5 nimmt die im piezoelektrischen Element 1 gespeicherte Energie weiter ab, und dementsprechend nehmen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und dessen äußere Abmessungen ebenfalls ab.

Wiederholt man das beschriebene Schließen und Öffnen des Entladeschalters 5 eine Vielzahl von Malen, so nehmen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und die Ausdehnung des piezoelektrischen Elements stufenweise ab (siehe hierzu die Kurve A in der Fig. 6).

Wurde der Entladeschalter 5 eine vorbestimmte Anzahl von Malen geschlossen und geöffnet und/oder hat das piezoelektrische Element den gewünschten Entladezustand erreicht, so wird das Entladen des piezoelektrischen Elements durch Offenlassen des Entladeschalters 5 beendet.

Das Ausmaß und der Verlauf des Ladens und des Entladens sind durch die Häufigkeit und die Dauer des Öffnens und Schließens des Ladeschalters 3 und des Entladeschalters 5 bestimmbar. Dies gilt nicht nur für die in der Fig. 1 gezeigte Anordnung, sondern für alle Anordnungen, durch welche ein vergleichbares Laden und/oder Entladen von piezoelektrischen Elementen durchführbar ist; die besagten Anordnungen müssen dabei im wesentlichen "nur" für ein getaktetes Laden und Entladen eines oder auch mehrerer piezoelektrischer Elemente geeignet sein.

Die Betätigung des Ladeschalters 3 und des Entladeschalters 5 erfolgt durch eine in der Fig. 1 nicht gezeigte Steuer- oder Regeleinrichtung. Diese Steuer- oder Regeleinrichtung führt ein derartiges Öffnen und Schließen des Ladeschalters 3 und des Entladeschalters 5 durch, daß das zu ladende bzw. zu entladende piezoelektrische Element dadurch unter Einhaltung eines vorgegebenen mittleren (Lade- bzw. Entlade-)Stromflusses auf eine vorgegebene Spannung gebracht wird.

Hierzu werden der Ladeschalter 3 bzw. der Entladeschalter 5 zu bestimmten Zeitpunkten geöffnet und geschlossen, wobei sich die Zeiten, während welcher die jeweiligen Schalter geschlossen sind, und die Zeiten, während welcher die jeweiligen Schalter geöffnet sind, gleich oder unterschiedlich lang sein können und selbst innerhalb eines jeweiligen Lade- bzw. Entladevorganges beliebig verändert

werden können.

Die Dauer und die Häufigkeit des Öffnens und Schließens des Ladeschalters 3 und des Entladeschalters 5 hängen vom Aufbau und den technischen Daten der das piezoelektrische Element ladenden bzw. entladenden Anordnung sowie dem angestrebten Ausmaß und dem angestrebten Verlauf des Ladens und Entladens ab, wobei das optimale Ausmaß und der optimale Verlauf des Ladens bzw. Entladens ihrerseits wiederum von den momentanen Betriebsbedingungen der Einrichtung abhängen, in welcher das piezoelektrische Element eingesetzt wird.

Wird das piezoelektrische Element wie vorliegend als Aktor in einer Kraftstoff-Einspritzdüse eines Common Rail Injectors einer Brennkraftmaschine eingesetzt, so variieren das erforderliche Ausmaß und der erforderliche Verlauf des Ladens und des Entladens insbesondere in Abhängigkeit von

- 1) der pro Einspritzvorgang einzuspritzenden Kraftstoffmenge,
- 2) der Motordrehzahl,
- 3) dem Druck im Rail, und
- 4) der Motortemperatur;

von diesen Parametern hängt es ab, innerhalb welcher Zeit das zu ladende bzw. zu entladende piezoelektrische Element wie weit geladen bzw. entladen werden sollte bzw. muß, also welcher Ladestrom bzw. Entladestrom fließen muß, um das piezoelektrische Element spätestens nach der zur Verfügung stehenden Zeit wunschgemäß weit geladen oder entladen zu haben.

Daß der so oder anders festgelegte Lade- bzw. Entladestrom tatsächlich auch fließt, kann durch eine Steuereinrichtung oder eine Regeleinrichtung erreicht werden, wobei der Stromfluß jedoch sowohl bei der Steuerung als auch bei der Regelung durch ein entsprechend häufiges und langes Öffnen und Schließen des Ladeschalters bzw. des Entladeschalters eingestellt wird.

Bei der Steuerung muß vorab eine Festlegung der Ein- und Ausschaltzeitpunkte und/oder der Dauer der jeweiligen Schaltzustände des Ladeschalters und des Entladeschalters erfolgen oder zumindest eine Rechenvorschrift zur Berechnung derselben ermittelt werden. Hierzu wird für die das piezoelektrische Element ladende und entladende Anordnung einschließlich des piezoelektrischen Elements, also beispielsweise für die in der Fig. 1 gezeigte Anordnung ein Modell (Ersatzschaltbild) gebildet bzw. erstellt. Für die in diesem Modell interessierenden Größen, also insbesondere für den das piezoelektrische Element ladenden und entladenden Strom und die sich am piezoelektrischen Element als Folge dessen einstellende Spannung werden Gleichungen (Differentialgleichungen) aufgestellt, und aus diesen Gleichungen läßt sich schließlich berechnen, zu welchen Zeitpunkten der Ladeschalter und der Entladeschalter geöffnet und geschlossen werden müssen bzw. wie lange der Ladeschalter und der Entladeschalter jeweils geöffnet und geschlossen bleiben müssen, um das piezoelektrische Element durch den vorgegebenen Strom auf die vorgegebene Spannung zu bringen.

Die Schaltzeitpunkte für den Ladeschalter und den Entladeschalter können im voraus berechnet und in einem Speicher der Steuereinrichtung abgelegt werden. Die gespeicherten Daten können dann während des Betriebs des piezoelektrischen Elements aus dem Speicher ausgelesen und zur Schalterbetätigung verwendet werden.

Die Schaltzeitpunkte für den Ladeschalter und den Entladeschalter können aber auch vor jeder Einspritzung aktuell berechnet werden.

In beiden Fällen, d. h. sowohl bei der Vorab-Berechnung der Schaltzeitpunkte als auch bei der aktuellen Berechnung der Schaltzeitpunkte können diese für verschiedene Betriebszustände berechnet werden, in welche insbesondere die vorstehend bereits genannten Parameter eingehen, von welchen der anzustrebende Umfang und der anzustrebende Verlauf des Ladens und Entladens abhängen.

Im Ergebnis gelangt man sowohl bei der Vorab-Berechnung der Schaltzeitpunkte als auch bei der aktuellen Berechnung der Schaltzeitpunkte zu einem Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements wie es in Fig. 6 beispielhaft veranschaulicht ist.

In der Fig. 6 repräsentiert

- die mit A bezeichnete Kurve den Verlauf der sich am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung,
- die mit B bezeichnete Kurve den Ladestrom bzw. den Entladestrom, durch den das piezoelektrische Element geladen bzw. entladen wird,
- die mit C bezeichnete Kurve den Schaltzustand des Ladeschalters, und
- die mit D bezeichnete Kurve den Schaltzustand des Entladeschalters.

Aus dem wie gezeigt erfolgenden wiederholten Schließen und Öffnen des Ladeschalters (Kurve C) resultiert ein zwar schwankender, aber im Mittel gleichbleibend großer Ladestrom (Kurve B), durch den sich am piezoelektrischen Element eine im Mittel gleichmäßig auf einen vorgegebenen Endwert ansteigende Spannung (Kurve A) einstellt; aus dem wie gezeigt erfolgenden wiederholten Schließen und Öffnen des Entladeschalters (Kurve D) resultiert ein zwar schwankender, aber im Mittel gleichbleibend großer Entladestrom (Kurve B), durch den sich am piezoelektrischen Element eine im Mittel gleichmäßig auf einen vorgegebenen Endwert abfallende Spannung (Kurve A) einstellt.

Das Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements unter Steuerung durch eine Steuereinrichtung hat gegenüber dem Laden und Entladen unter Regelung durch eine Regeleinrichtung den Vorteil, daß keine Sensoren zur Verfolgung des Lade- bzw. Entladestroms und der sich am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung erforderlich sind, und daß Störgrößen keinen Einfluß auf die Ansteuerung nehmen können.

Die "Datenspeicherlösung", bei welcher die Schalterbetätigungszeitpunkte (oder diese repräsentierende Größen) in einem Speicher gespeichert sind, ist insofern vorteilhaft, als die Steuereinrichtung nicht durch Rechenaufwand belastet wird und Fehlberechnungen vor dem Speichern korrigiert werden können.

Andererseits hat die "Rechenlösung", bei welcher die Schalterbetätigungszeitpunkte (oder diese repräsentierende Größen) jeweils aktuell berechnet werden, den Vorteil, daß der Speicherplatzbedarf in der Steuereinrichtung gering ist und die berechneten Daten mit vergleichsweise geringem Aufwand ganz exakt auf die jeweiligen Verhältnisse (Betriebszustände) zugeschnitten werden können.

Bei einer Betätigung des Ladeschalters und des Entladeschalters durch eine Regeleinrichtung werden zunächst der mittlere (Soll-)Strom, durch den das piezoelektrische Element geladen und entladen werden soll, und die (Soll-)Endspannung, auf die das piezoelektrische Element gebracht werden soll, festgelegt. Bei dieser Festlegung wird dem Umstand Rechnung getragen, daß das piezoelektrische Element innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne auf eine gewünschte Spannung aufgeladen werden soll bzw. muß.

Wird das piezoelektrische Element wie vorliegend als Aktor in einer Kraftstoff-Einspritzdüse eines Common Rail

Injectors einer Brennkraftmaschine eingesetzt, so variieren die vorgegebene Zeit und die gewünschte Spannung insbesondere in Abhängigkeit von

- 1) der pro Einspritzvorgang einzuspritzenden Kraftstoffmenge,
- 2) der Motordrehzahl,
- 3) dem Druck im Rail, und
- 4) der Motortemperatur.

Bei einem durch die Regeleinrichtung erfolgenden geregelten Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements müssen in der Anordnung zum Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements, also beispielsweise in der Anordnung gemäß Fig. 1 Sensoren zur Erfassung des Lade- bzw. Entladestroms und der sich am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung vorgesehen werden.

Der Lade- und Entladestrom wird dann beispielsweise durch einen Zwei-Punkt-Regler innerhalb eines Bandes um den Soll-Strom  $I_{soll}$  gehalten, wobei das Band durch einen oberhalb des Soll-Stroms gelegenen Maximal-Strom  $I_{max}$  und einen unterhalb des Soll-Stroms gelegenen Minimal-Strom  $I_{min}$  definiert (begrenzt) wird.

Der durch den Stromsensor gemessene tatsächliche Lade- bzw. Entladestrom  $I_{ist}$  wird laufend mit dem Maximal-Strom  $I_{max}$  und dem Minimal-Strom  $I_{min}$  verglichen. Wird  $I_{ist}$  kleiner als  $I_{min}$  oder größer als  $I_{max}$ , entfernt sich  $I_{ist}$  also zu weit von  $I_{soll}$ , so wird durch die Regeleinrichtung eine veränderte Betätigung des Ladeschalters bzw. Entladeschalters veranlaßt. Ein zu hoher Strom kann durch ein kürzeres und/oder weniger häufiges Schließen des Ladeschalters bzw. Entladeschalters reduziert werden, und ein zu niedriger Strom kann durch ein längeres und/oder häufigeres Schließen des Ladeschalters bzw. Entladeschalters erhöht werden. Auf diese Weise kann das piezoelektrische Element durch einen im Mittel etwa gleichbleibend hohen Strom geladen und entladen werden.

Zugleich wird laufend die am piezoelektrischen Element gemessene Spannung  $U_{ist}$  mit der Soll-Endspannung  $U_{soll}$  verglichen. Der Ladevorgang bzw. der Entladevorgang wird beendet, sobald  $U_{soll}$  von  $U_{ist}$  erreicht wird. Das piezoelektrische Element kann dadurch durch einen im Mittel etwa gleichbleibend hohen Strom auf eine vorbestimmte Spannung gebracht werden.

Der Vergleich von  $I_{ist}$  mit  $I_{min}$  und  $I_{max}$  und der Vergleich von  $U_{ist}$  mit  $U_{soll}$  wird in analogen oder digitalen Vergleichern durchgeführt. Die Referenzwerte der Vergleicher, d. h.  $I_{min}$ ,  $I_{max}$  und  $U_{soll}$  sind variabel, vorzugsweise betriebspunktabhängig einstellbar; es können jedoch auch fest eingestellte (nicht veränderliche) Werte sein.

Die sich beim Laden und beim Entladen des piezoelektrischen Elements unter Regelung durch die Regeleinrichtung ergebenden Verhältnisse entsprechen den in der Fig. 6 dargestellten und unter Bezugnahme darauf beschriebenen Verhältnissen.

Verfolgt man den zeitlichen Verlauf der Ein- und/oder Ausgangssignale der Vergleicher, so kann daraus auf besonders einfache Art und Weise der zeitliche Verlauf und/oder Fortschritt des Ladens oder Entladens ermittelt bzw. überwacht werden. Weichen der ermittelte zeitliche Verlauf und/oder Fortschritt des Ladens und/oder Entladens von einem bekannten bestimmungsgemäßen Verlauf und/oder Fortschritt ab, so kann daraus auf bestimmte Beschädigungen und Alterungserscheinungen des oder der jeweils zu ladenden oder entladenden piezoelektrischen Elemente oder deren Zuleitungen geschlossen werden. Ein praktisches Beispiel wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Fig. 7 beschrieben.

Die Fig. 7 zeigt stark schematisiert den bestimmungsgemäßen Verlauf der sich an einem piezoelektrischen Element während des Ladens desselben einstellenden Spannung. Die Spannung steigt vom Beginn des Ladens an (Zeitpunkt  $t_0$ ) im wesentlichen linear auf ihren Sollwert  $U_{soll}$  an; auf das Erreichen des Sollwertes  $U_{soll}$  in, was bei dem betrachteten ordnungsgemäß funktionierenden System zum Zeitpunkt  $t_s$  der Fall ist, wird der Ladevorgang beendet.

Die Zeit, während welcher das piezoelektrische Element geladen wird bzw. werden muß, um auf die Spannung  $U_{soll}$  gebracht zu werden, kann aus den Ein- und/oder Ausgangssignalen der vorstehend bereits erwähnten Vergleicher ermittelt werden.

Im betrachteten Beispiel wird davon ausgegangen, daß es sich bei dem zu ladenden piezoelektrischen Element um eine Vielzahl von übereinandergestapelten Einzelementen handelt.

Wird die Sollspannung ungefähr zum Zeitpunkt  $t_s$  (innerhalb eines sich von  $t_s - \Delta t$  bis  $t_s + \Delta t$  erstreckenden Toleranzbereiches  $T$ ) erreicht, so arbeiten das System und seine Komponenten ordnungsgemäß.

Wird die Sollspannung vor  $t_s - \Delta t$  erreicht, liegt also eine gegenüber dem Normalfall verkürzte Ladezeit vor, so kann sofern das Laden unter den üblichen Bedingungen, insbesondere mit dem üblichen Ladestrom durchgeführt wird – darauf geschlossen werden, daß das zu ladende piezoelektrische Element beschädigt oder gealtert ist. Die verkürzte Ladezeit deutet nämlich darauf hin, daß das zu ladende piezoelektrische Element eine gegenüber dem ungestörten Normalfall verringerte Kapazität aufweist, was seinerseits wiederum ein Anzeichen dafür ist, daß eines oder mehrere der übereinandergestapelten piezoelektrischen Einzelemente ausgefallen sind oder jedenfalls nicht mehr ihre ursprünglichen Eigenschaften besitzen. Piezoelektrische Elemente weisen nämlich kapazitive Eigenschaften auf, wobei sich die Gesamtkapazität aus der Summe der Kapazitäten der piezoelektrischen Einzelemente ergibt.

Verläuft die Verkürzung der Ladezeit sprunghaft, so deutet dies auf eine Beschädigung einzelner oder mehrerer piezoelektrischer Einzelemente hin. Stellt sich die Verkürzung der Ladezeit nur allmählich ein, so kann eine Beschädigung oder aber auch eine Alterung die Ursache sein.

Wird die Sollspannung nach  $t_s + \Delta t$  erreicht, liegt also eine gegenüber dem Normalfall verlängerte Ladezeit vor, so kann – sofern das Laden unter den üblichen Bedingungen durchgeführt wird – darauf geschlossen werden, daß die Zuleitung zum piezoelektrischen Element beschädigt ist; in diesem Fall kann nämlich kein oder jedenfalls nicht der gewünschte Strom zum piezoelektrischen Element fließen.

Die selben Schlußfolgerungen lassen sich ziehen, wenn zusätzlich oder alternativ verkürzte oder verlängerte Entladezeiten detektiert werden.

Es erweist sich als günstig, wenn ungewöhnlich kurze oder lange Lade- und/oder Entladezeiten zum Anlaß genommen werden, vor einem möglichen Ausfall bzw. einer bereits eingetretenen Verschlechterung des das betreffende piezoelektrische Element enthaltenden Systems zu warnen.

Auf die beschriebene Art und Weise kann der Zustand des piezoelektrischen Elements allein durch eine Überwachung der Lade- und/oder Entladezeiten desselben überprüft werden. Erreicht die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung bereits vor oder erst nach einer vorbestimmten Zeit nach einem bestimmten Ereignis oder Zeitpunkt die Sollspannung, so kann zweifelsfrei darauf geschlossen werden, daß das piezoelektrische Element oder dessen Zuleitung aufgrund von Defekten oder Alterungsprozessen nicht mehr ordnungsgemäß arbeitet, wobei die Ursache hierfür sogar örtlich lokalisierbar ist.



Die beschriebene Überwachung gestaltet sich erheblich einfacher als bisher, wo eine Überprüfung des piezoelektrischen Elements nur durch ein Vermessen desselben in einer Prüfvorrichtung erfolgen konnte; das piezoelektrische Element kann im eingebauten Zustand während des normalen Betriebes überwacht bzw. getestet werden, und die Überwachung bzw. der Test kann im wesentlichen ohne komplizierte Zusatzeinrichtungen, insbesondere auch ohne Strommesser oder dergleichen durchgeführt werden.

Anordnungen, die wie vorstehend beschrieben ansteuerbar sind, können besonders einfach aufgebaut werden, da zum Laden und zum Entladen des piezoelektrischen Elements mangels strenger Anforderungen an die technischen Daten ein und dieselbe Spule (bei der Anordnung gemäß Fig. 1 die Spule 2) verwendbar ist. Dadurch kann die Anzahl der Bauelemente, insbesondere die Anzahl der von Haus aus relativ großen Spulen minimal gehalten werden. Anstelle der Spule(n) können bei entsprechend modifiziertem Schaltungsaufbau übrigens auch andere induktive Eigenschaften aufweisende Bauelemente wie beispielsweise Übertrager, Transformatoren etc. verwendet werden.

Anstelle des einen piezoelektrischen Elements 1 können auf die vorstehend beschriebene Art und Weise auch einzelne oder mehrere piezoelektrische Elemente einer Vielzahl von parallel angeordneten und über Auswahlhalter selektierbaren piezoelektrischen Elementen geladen oder entladen werden.

Zusammenfassend kann abschließend festgestellt werden, daß sich durch die wie beschrieben erfolgende Betätigung des Ladeschalters und des Entladeschalters, genauer gesagt durch das dadurch bewerkstelligte Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements durch einen vorgebbaren mittleren Lade- bzw. Entladestrom auf eine vorgegebene Spannung ein für das piezoelektrische Element schonendes und einfach an die individuellen oder wechselnde Verhältnisse anpaßbares Laden und Entladen durchführen läßt.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements (1), wobei der das piezoelektrische Element ladende Ladestrom bzw. der das piezoelektrische Element entladende Entladestrom über ein induktive Eigenschaften aufweisendes Bauelement (2) geführt wird, **dadurch gekennzeichnet**, daß ein im Ladestromkreis vorgesehener Schalter (3) bzw. ein im Entladestromkreis vorgesehener Schalter (5) während des Ladens bzw. Entladens derart wiederholt betätigt wird, daß das piezoelektrische Element durch einen vorgegebenen mittleren Lade- bzw. Entladestrom auf eine vorgegebene Spannung gebracht wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das piezoelektrische Element (1) als Aktor in einer Kraftstoff-Einspritzdüse einer Brennkraftmaschine verwendet wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß der mittlere Lade- bzw. Entladestrom und die vorgegebene Spannung variabel sind und insbesondere in Abhängigkeit von wenigstens der pro Einspritzvorgang einzuspritzenden Kraftstoffmenge, der Motordrehzahl, dem Druck im Rail oder der Motortemperatur festgelegt werden.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Zeitpunkte, zu denen der zu betätigende Schalter (3, 5) geöffnet und geschlossen werden muß, in einer Speichereinrichtung gespeichert sind und während des Betriebs des piezoelektrischen Elements (1) aus dieser ausgelesen werden.

den.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Zeitpunkte, zu denen der zu betätigende Schalter (3, 5) geöffnet und geschlossen werden muß, während des Betriebs des piezoelektrischen Elements (1) aktuell berechnet werden.

6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, daß das Auslesen der Zeitpunkte, zu denen der zu betätigende Schalter (3, 5) geöffnet und geschlossen werden muß bzw. die Berechnung derselben unter Berücksichtigung des Betriebszustandes erfolgt, in welchem sich die das zu ladende bzw. zu entladende piezoelektrische Element (1) enthaltende Einrichtung zum betreffenden Zeitpunkt befindet.

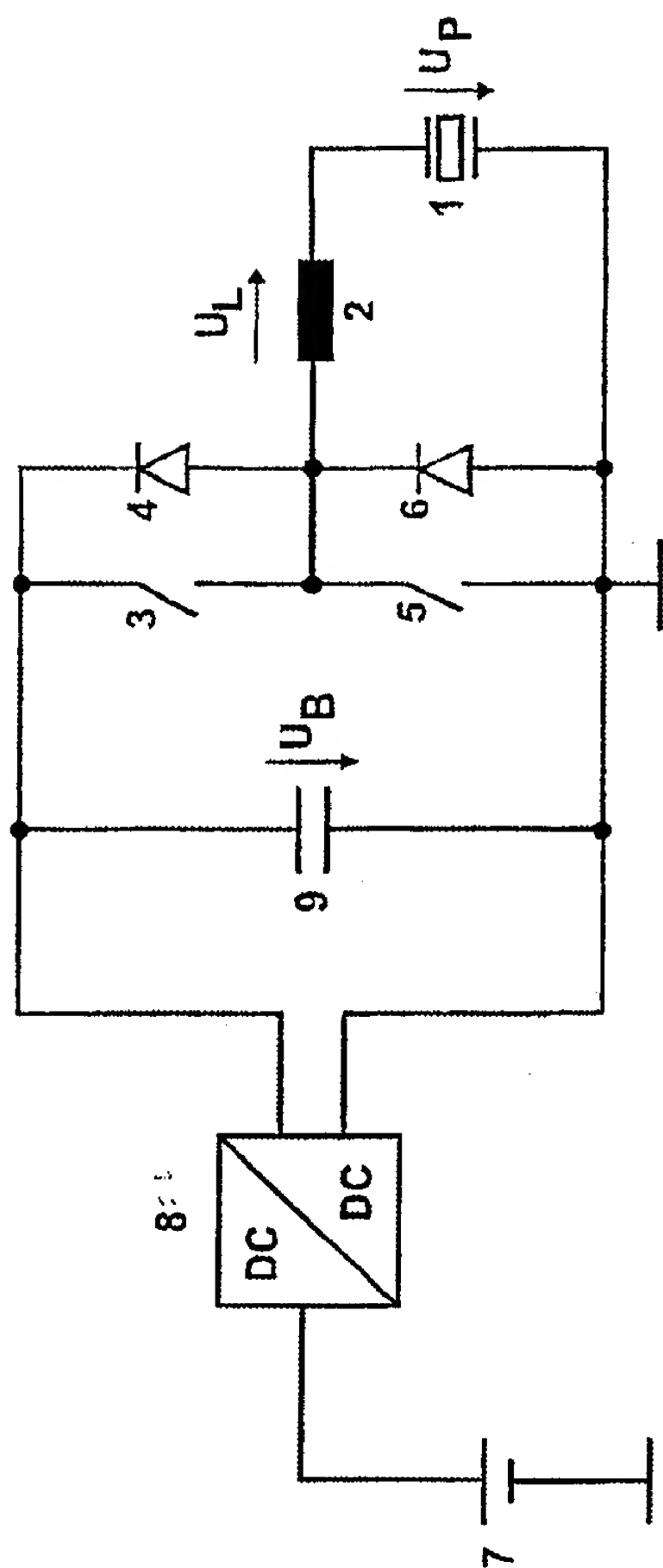
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß der Ladestrom bzw. der Entladestrom fortlaufend gemessen und durch ein entsprechendes Öffnen und Schließen des zu betätigenden Schalters (3, 5) so nachgeregelt wird, daß er innerhalb eines definierten Bandes um einen Soll-Strom bleibt.

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß das Laden bzw. Entladen beendet wird, wenn eine Messung der sich am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung ergibt, daß diese eine Soll-Spannung erreicht hat.

9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Zeit gemessen wird, die von einem bestimmten Ereignis oder Zeitpunkt an vergeht, bis der Ladestrom bzw. der Entladestrom die obere oder die untere Grenze des um den Soll-Strom definierten Bandes erreicht hat oder bis die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung die Soll-Spannung erreicht hat.

10. Vorrichtung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements (1), wobei der das piezoelektrische Element ladende Ladestrom bzw. der das piezoelektrische Element entladende Entladestrom über ein induktive Eigenschaften aufweisendes Bauelement (2) geführt wird, gekennzeichnet durch eine Steuer- oder Regeleinrichtung, welche dazu ausgelegt ist, einen im Ladestromkreis vorgesehenen Schalter (3) bzw. einen im Entladestromkreis vorgesehenen Schalter (5) während des Ladens bzw. Entladens derart wiederholt zu betätigen, daß das piezoelektrische Element durch einen vorgegebenen mittleren Lade- bzw. Entladestrom auf eine vorgegebene Spannung gebracht wird.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen



**FIG. 1**



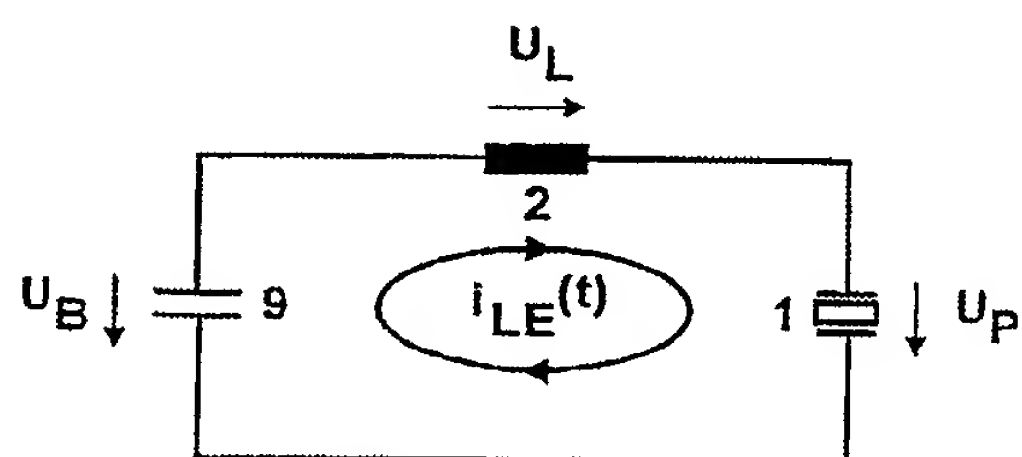


FIG. 2

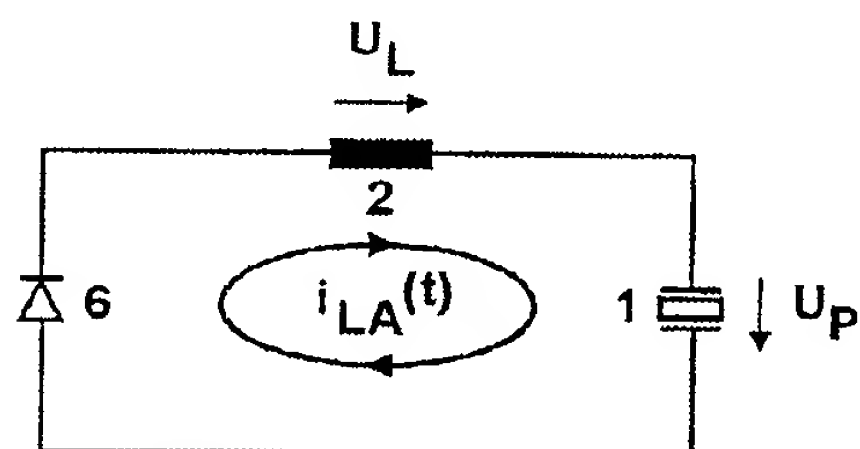


FIG. 3

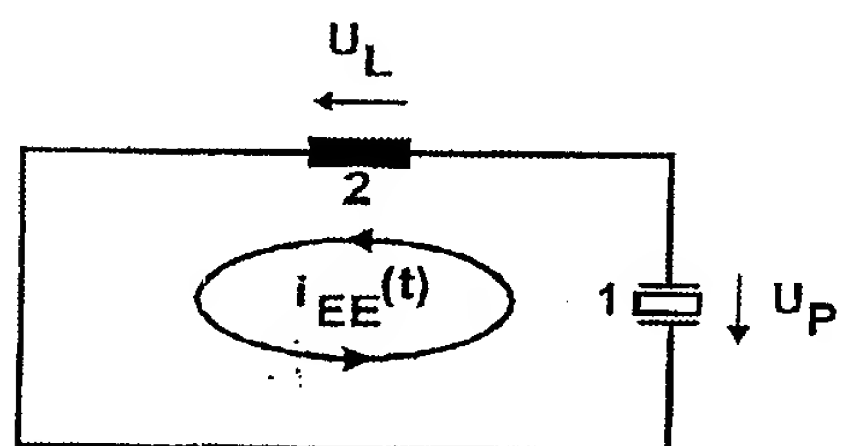


FIG. 4

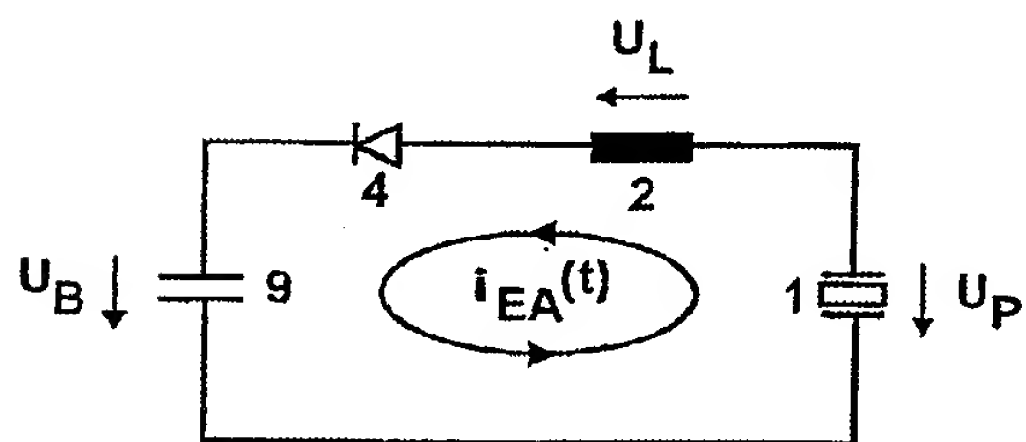


FIG. 5

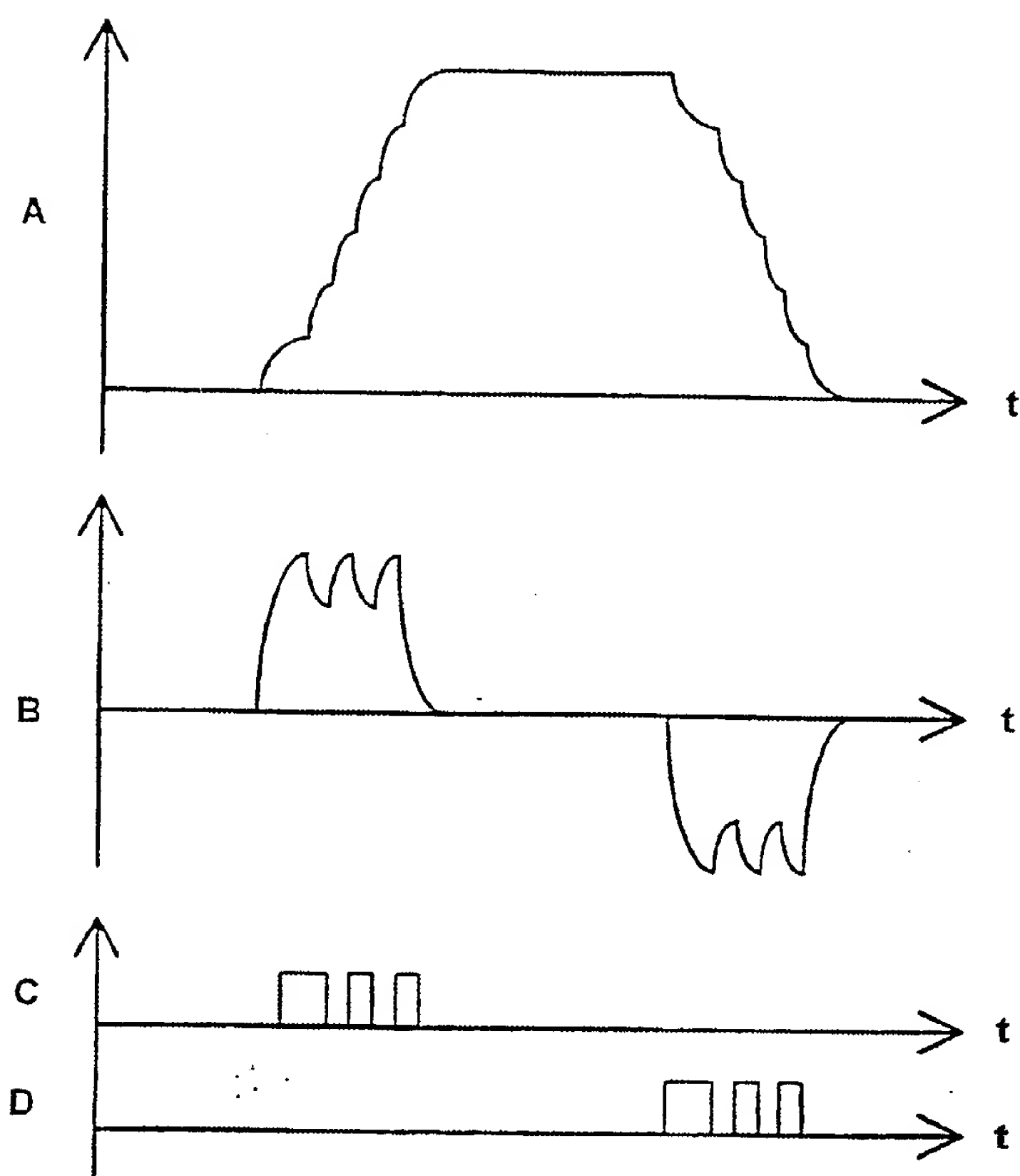


FIG. 6

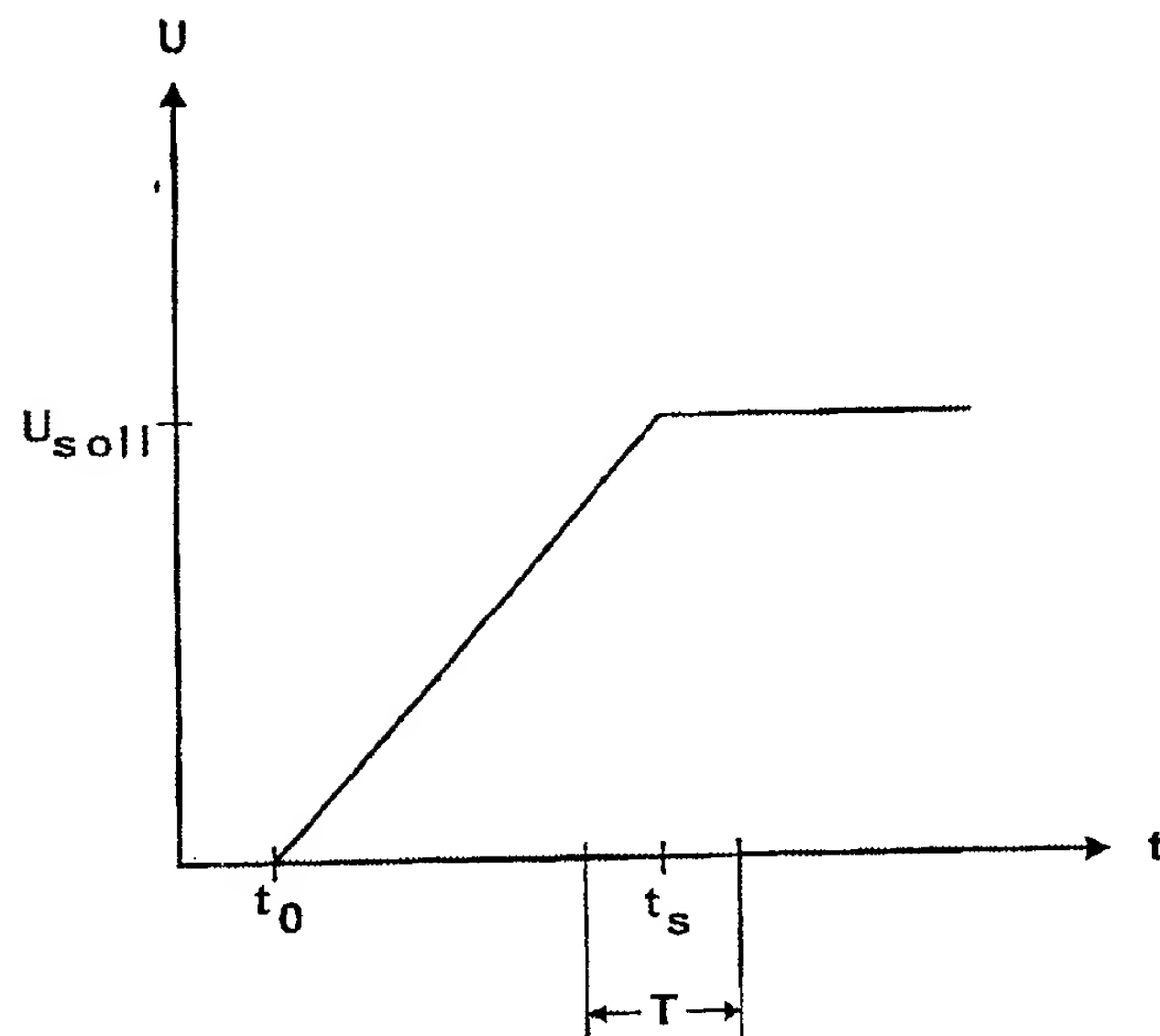
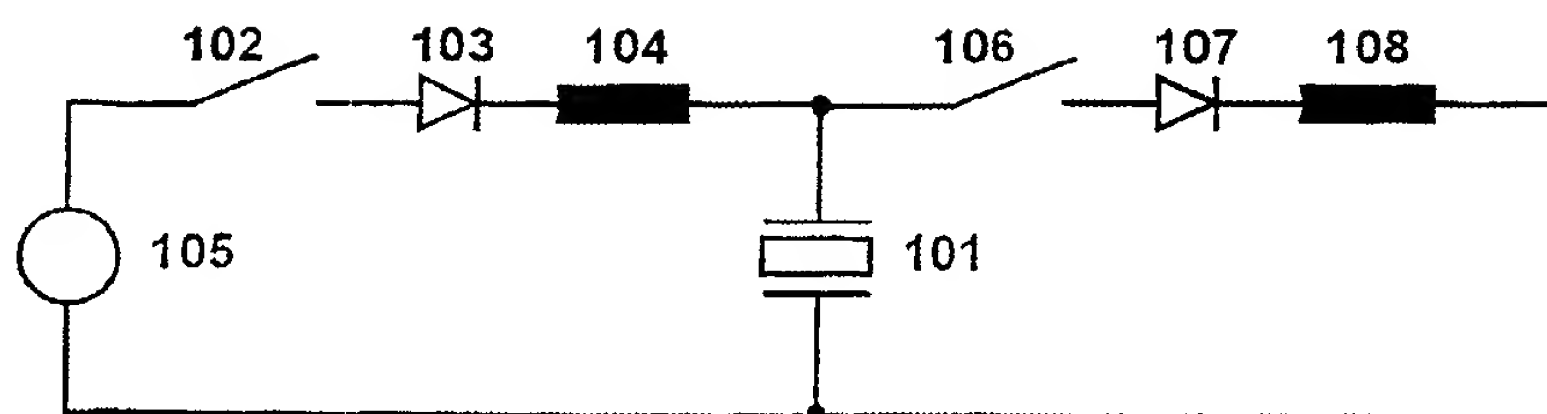


FIG. 7



**FIG. 8**